

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE KOMPOZYTÓW POLIESTROWO SZKLANYCH Z PRZEKŁADKĄ TYPU SPHERESKIN

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych kompozytów przekładkowych z zastosowaniem przekładki typu sphereskin i porównano je z wynikami badań laminatu wykonanego z tych samych materiałów ale bez przekładki. Próbkki zostały poddane testom udarności oraz czteropunktowego zginania. Próbkki z kompozytu przekładkowego zawsze ulegały zniszczeniu przez rozwarstwienie w warstwie przekładki, stąd dużo mniejsza ich udarność od próbek z laminatu. Jednak moduły zginania obu rodzajów kompozytów były porównywalne. Zatem należałoby zwiększyć adhezję warstw przekładki przez rozdzielanie ich warstwą maty szklanej przesyconą żywicą.

WSTĘP

Wraz z rozwojem energooszczędnych technologii oraz nieustannie rosnącą świadomością proekologiczną zwiększa się zastosowanie lekkich materiałów konstrukcyjnych we wszystkich rodzajach środków transportu. Najistotniejsze zmiany w stosowanych materiałach konstrukcyjnych zachodzą w transporcie lotniczym. W transporcie naziemnym lekkie materiały konstrukcyjne, takie jak laminaty z włóknistym wzmocnieniem szklanym lub węglowym mają już swoją historię. W celu obniżenia masy poszyc kadłubów samolotów oraz karoserii naziemnych środków transportu stosuje się również kompozyty przekładkowe. W transporcie lotniczym stosuje się przykładowo kompozyty z przekładką o strukturze plastra miodu.

W niniejszym artykule zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych kompozytu przekładkowego i laminatu. Laminat wykonano z żywicy poliestrowej i włóknistego wzmocnienia szklanego. Warstwy konstrukcyjne kompozytu przekładkowego wykonano z tych samych materiałów oraz z przekładki typu sphereskin. Próbkki zostały poddane testom udarnościowym oraz próbie zginania czteropunktowego. Wyniki badań zostały zestawione i omówione.

1. PRÓBKKI DO BADAŃ

1.1. Laminat bez przekładki

Do wykonania próbek zastosowano żywicę poliestrową izoftalową K530, szklaną tkaninę rowingową o gramaturze 600 g/m², dwa rodzaje mat szklanych o gramaturach 300 g/m², 450 g/m² oraz welon szklany V30 o gramaturze 30 g/m², który stanowi część warstwy chemoodpornej laminatu. Testom udarnościowym poddano próbki z laminatu o czterech różnych grubościach: D1, D2, D3, D4, a próbie zginania poddano tylko próbki o grubości D2. Dokładną strukturę laminatów przedstawia Tab. 1. Wymiary średnie przekrojów widoczne są w Tab. 2.

Tab. 1. Struktura przetestowanych laminatów

Symbol	Struktura laminatu	Oznaczenia skrótów	
D1	Wch+ (M450+R600)*1+M450+V30	Wch	V30+M300+(M450)*2
D2	Wch+ (M450+R600)*4+M450+V30	M300	Maty szklane 300 g/m ²
D3	Wch+ (M450+R600)*5+M450+V30	M450	Maty szklane 450 g/m ²
D4	Wch+ (M450+R600)*6+M450+V30	R600	Tkanina rowingowa 600 g/m ²

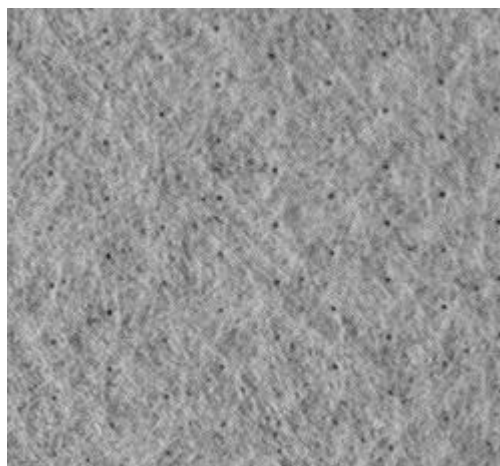
Tab. 2. Wymiary poprzeczne próbek z laminatu

Symbol	Grubość [mm]	Szerokość [mm]	Pole przekroju [mm ²]
D1	9,2	28,7	264
D2	11,2	30	336
D3	12,3	28	344,4
D4	14	29	406

W tym miejscu należy zaznaczyć, że próbki zostały przygotowane z elementów już dostarczonych. Aby nie uszkodzić próbek, zrezygnowano z docinania ich do szerokości 15 mm, jak zaleca norma PN-EN-ISO 179-1:2002.

1.2. Kompozyt przekładkowy

Materiał przekładki, czyli sphertex sphereskin, jest materiałem o strukturze welonu szklanego, którego objętość została zwiększona dzięki termoplastycznym kuleczkom stanowiącym integralną część struktury materiału. Mikrokuleczki, które stanowią 40÷60 % objętości przekładki, są związane chemicznie lub mechanicznie z włóknami szklanymi stanowiącymi z nimi integralną strukturę. Przekładka tego typu charakteryzuje się spójnością, niską chłonnością żywicy a przy tym bardzo dobrymi właściwościami adhezyjnymi. Strukturę przekładki przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Struktura przekładki sphertex sphereskin

Strukturę oraz wymiary poprzeczne próbek przekładkowych przedstawia Tab. 3. Dolna i górna warstwa konstrukcyjna kompozy-

tu przekładkowego mają taką samą strukturę. Do ich wykonania użyto takich samych materiałów jak do wykonania pełnego laminatu.

Próbki były kondycjonowane w temperaturze pokojowej przez ponad pięć lat, co stanowi dodatkowy atut przeprowadzonych badań wytrzymałościowych.

Tab. 3. Struktura i wymiary próbek przekładkowych

Symbol	E2S3,9
Struktura	M450+R600+M450+S3,9+M450+R600+M450
Grubość warstwy konstrukcyjnej	3,4 mm
Grubość przekładki	3,9 mm
Średnia grubość panelu	10,7 mm
Szerokość próbek	24,9 mm

2. WYNIKI BADAŃ UDARNOŚCIOWYCH KOMPOZYTÓW PRZEKŁADKOWYCH ORAZ LAMINATÓW

Próby udarności zostały przeprowadzone za pomocą młota Charpy'ego. Zastosowano dwa rodzaje młotów: 6 kg oraz 30 kg. Przygotowane próbki nie miały karbu. Udarność została obliczona zgodnie z normą PN-EN-ISO 179-1:2002 według wzoru (1).

$$a_{cU} = \frac{E_C}{b \cdot h} \quad (1)$$

Gdzie:

a_{cU} – udarność [kJ/m²]

E_C – skorygowana energia zużyta na złamanie próbki

b – szerokość próbki

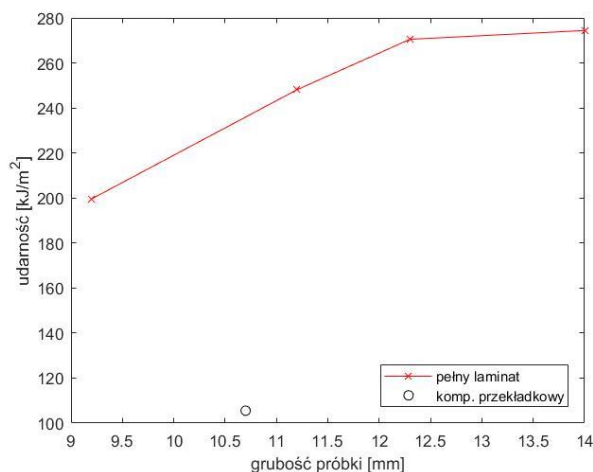
h – grubość próbki.

Z każdego rodzaju kompozytu przebadano cztery próbki. Wyniki testów udarnościowych przedstawia Tab. 4.

Tab. 4. Wyniki prób udarnościowych

Symbol	Udarność [kJ/m ²]				Udarność średnia
	Próbka 1°	Próbka 2°	Próbka 3°	Próbka 4°	
D1	185,7	185,7	222,8	204,3	199,6
D2	251,0	245,2	262,7	233,5	248,1
D3	279,1	253,4	287,6	262,0	270,5
D4	362,3	410,6	386,5	338,2	274,4
E2S3,9	101,3	114,1	97,6	108,8	105,5

Porównanie wartości wziętych z Tab. 2+4 wskazuje na zależność udarności od grubości próbki. Tę zależność przedstawia wykres na Rys. 2.



Rys. 2. Zależność udarności od grubości próbek

Dla przekroju prostokątnego $I_z = bh^3/12$ we wzorze (3). Z analizy tego wzoru wynika zatem, że energia odkształcenia sprężystego belki zależy od h^3 , a stosunek energii odkształcenia sprężystego do pola przekroju powinien zależeć od h^2 . Wykres na Rys. 2. nie przedstawia tej zależności. Można wskazać trzy przyczyny zaistniałej rozbieżności:

1. Zmierzona energia złamania jest sumą energii odkształcenia sprężystego oraz energii zniszczenia próbki.
2. Wszystkie kompozyty warstwowe, z których zostały wycięte próbki zostały wykonane metodą ręczną. Zatem w przypadku grubszych laminatów istnieje większe prawdopodobieństwo niedostatecznego nasączenia zbrojenia żywicą.
3. Badania udarnościowe zostały wykonane za pomocą młota Charpy'ego o maksymalnym rozstawie podpór 70 mm. Zgodnie z normą [1] rozstaw podpór powinien odpowiadać sześciokrotnej grubości próbki. W przypadku laminatu D4 o grubości 14 mm rozstaw ten powinien wynosić 84 mm. Zatem w przypadku próbki D4 zmierzona wartość energii zużytej na jej złamanie może być zaniżona.

Próbka z kompozytu przekładkowego posiada znacznie niższą udarność niż próbki z pełnego laminatu. Porównując złomy próbki z pełnego laminatu oraz kompozytu przekładkowego można zauważyć, że próbki z pełnego laminatu pękały głównie przez przekroczenie dopuszczalnych naprężeń na rozciąganie i ściskanie (Rys. 3.). Powstałe rozwarstwienie w miejscu złomu może być skutkiem wyboczenia warstw laminatu.



Rys. 3. Złom próbki z pełnego laminatu

W przypadku kompozytu przekładkowego widoczne jest wyraźne zniszczenie przez rozwarstwienie wewnątrz przekładki (Rys. 4.).



Rys. 4. Złom próbki z kompozytu przekładkowego

Według danych producenta materiał przekładki kompozytu ma grubość 1,3 mm [2]. Zatem przekładka o grubości 3,9 mm składa się z trzech warstw materiału sphereskin połączonych ze sobą warstwą żywicy. Można wnioskować, że takie połączenie warstw

przekładki jest niewystarczające. Należałoby użyć przynajmniej jednej warstwy maty szklanej dla oddzielenia warstw przekładki.

3. WYNIKI ZGINANIA CZTEROPUNKTOWEGO KOMPOZYTU PRZEKŁADKOWEGO ORAZ LAMINATU

Ponieważ próbki z kompozytu przekładkowego mogą być wrażliwe na działanie skupionej siły, badania wytrzymałościowe na zginanie przeprowadzono w warunkach czteropunktowego zginania. Zatem środek próbki obciążony największym momentem zginającym nie był obciążony dodatkową skupioną siłą tnącą. Próby zginania czteropunktowego wykonano zgodnie z normą „Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem - Oznaczanie właściwości przy zginaniu” [3]. Badania przeprowadzono dla pięciu próbek z kompozytu przekładkowego oraz dla takiej samej liczby próbek z pełnego kompozytu D2. Dla wszystkich próbek obliczono moduł zginania.

3.1. Wyznaczanie modułu zginania

W celu obliczenia modułu zginania posłużono się zależnością z Klasycznej Teorii belek Zginanych (2). Ponieważ moduł wyznaczany jest przy niewielkich odkształceniach, przyjmujemy, że założenia wspomnianej teorii są spełnione.

$$E_f I_z \frac{d^2 y}{dx^2} = -M(x) \quad (2)$$

Gdzie:

- E_f – moduł zginania,
- y – oś przemieszczenia skierowana w dół,
- x – współrzędna wzdłuż długości belki,
- $M(x)$ – moment gnący w przekroju belki o współrzędnej x ,
- I_z – moment bezwładności przekroju względem osi obojętnej.

Podczas badań odległość pomiędzy osiami górnych wałków obciążających wynosiła $l = 50$ mm, a odległość pomiędzy dolnymi podporami wynosiła $3l = 150$ mm. Dla takich ustawień oraz dla $I_z = bh^3/12$ zależność (2) można przekształcić do postaci (3).

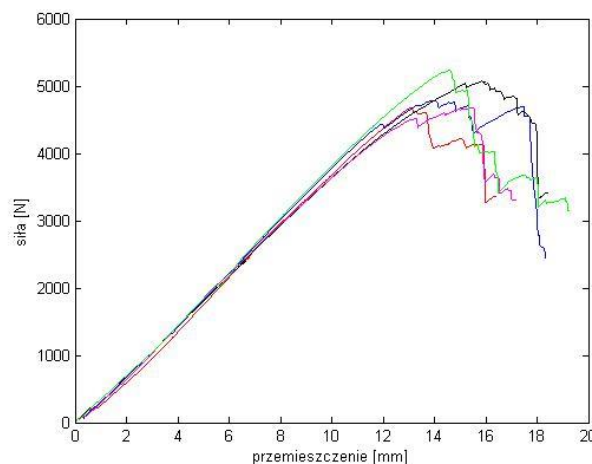
$$E_f = \frac{5l^3}{12I_z} \frac{\Delta P}{\Delta y} \quad (3)$$

Gdzie $\Delta P/\Delta y$ jest stosunkiem przyrostu siły nacisku do przyrostu przesunięcia górnych wałków obciążających.

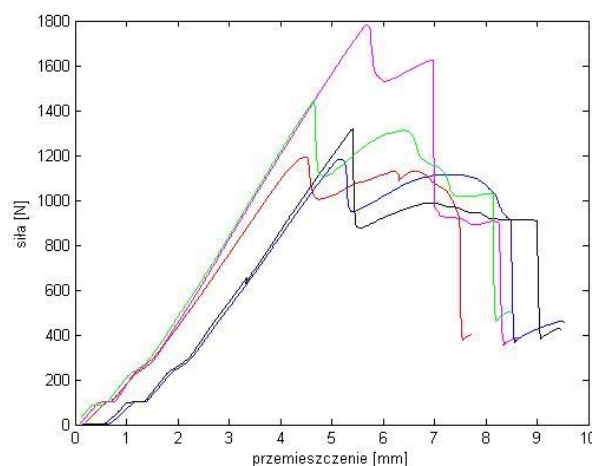
Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej oprzyrządowanej miernikami oraz wzmacniaczem pomiarowym MGCPlus firmy HBM. Wartość $\Delta P/\Delta y$ wyznaczono z wykresu zależności siły i przesunięcia wałków, których wartości zarejestrowano podczas próby wytrzymałościowej. Wykresy tych zależności przedstawia Rys. 5.

Średni moduł zginania dla próbek z laminatu obliczony według wzoru (3) wynosi $E_f = 6811,3$ MPa. Natomiast średni moduł zginania dla próbek z kompozytu przekładkowego wynosi $E_f = 6961$ MPa. Zatem moduły zginania obu kompozytów warstwowych są porównywalne.

Wykresy zależności siły od przemieszczenia wałków obciążających dla kompozytu przekładkowego przedstawia Rys. 6. Widoczne na wykresie przesunięcie wykresów wzdłuż osi odciętych jest skutkiem wcześniejszego włączenia rejestratora.



Rys. 5. Zależność siły od przesunięcia wałków obciążających dla próbek z pełnego laminatu



Rys. 6. Zależność siły od przesunięcia wałków obciążających dla próbek z kompozytu przekładkowego

3.2. Obliczenie dodatkowych stałych materiałowych

Dla próbek z laminatu obliczono dodatkowo maksymalne naprężenie normalne przy zginaniu, ponieważ wszystkie próbki tego typu uległy zniszczeniu przez pęknięcie zewnętrznych warstw konstrukcyjnych (Rys. 7). Do obliczeń zastosowano wzór (4).



Rys. 7. Złom próbki z laminatu podczas próby zginania

$$\sigma_{\max} = \frac{3Pl}{bh^2} [MPa] \quad (4)$$

Wszystkie próbki z kompozytu przekładkowego uległy zniszczeniu przez rozwarstwienie (Rys. 8.) materiału przekładki. Obciążeniem odpowiedzialnym za tego typu złom są naprężenia styczne w

warstwie przekładki. Z wzoru Żurawskiego [4] wiemy, że największe naprężenia styczne występują w warstwie obojętnej w miejscu przyłożenia zewnętrznej siły skupionej. Wzór Żurawskiego został wyprowadzony przy założeniach Klasycznej Teorii Belek Zginanych. Jedno z nich mówi, że przekroje prostopadłe do linii obojętnej belki przed odkształceniem pozostają do niej prostopadłe po odkształceniu. Drugie, że przekroje będące płaskimi przed odkształceniem pozostają płaskimi po odkształceniu. Niestety w przypadku belek z kompozytów przekładkowych, przy dużych odkształceniach te założenie nie są spełnione, co widać na zdjęciu wykonanym podczas próby zginania (Rys. 8.). Zatem wartości naprężeń stycznych obliczonych ze wzoru Żurawskiego dla jednorodnych belek o przekroju prostokątnym (5) są jedynie orientacyjne. Dokładne obliczenie wartości naprężenia stycznego odpowiedzialnego za rozwarstwienie jest możliwe tylko za pomocą metod nieliniowych teorii zginania, co nie jest przedmiotem niniejszej publikacji.

Wartości średnie modułów zginania oraz dodatkowych stałych materiałowych zestawione są w Tab. 5.



Rys. 8. Złom próbki z kompozytu przekładkowego podczas próby zginania czteropunktowego

$$\tau_{yx} = \frac{3T}{2b \cdot h} \quad (5)$$

Gdzie:

τ_{yx} - maksymalne naprężenie styczne w przekroju belki,

T – siła tnąca w przekroju belki

b – szerokość belki,

h – grubość belki.

Tab. 5. Zestawienie średnich stałych materiałowych kompozytów

Oznaczenie	Moduł zginania [MPa]	σ_{max} [MPa]	τ_{yx} [MPa]
D2	6811,3	212,5	x
E2S3,9	6961	x	7,4

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych pełnych laminatów oraz kompozytów przekładkowych z przekładką

typu sphereskin otrzymano wyniki, które upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Moduły zginania obu kompozytów mają porównywalne wartości.
2. Kompozyt przekładkowy z przekładką w postaci trzech warstw sphereskin uległ zniszczeniu przez rozwarstwienie zarówno w próbach udarności jak i zginania.
3. Należałoby rozdzielić warstwy sphereskin warstwami z maty szklanej w celu zwiększenia wytrzymałości na ścinanie.
4. Laminat poliestrowo szklany pękał wskutek przekroczenia dopuszczalnych naprężeń normalnych zarówno podczas prób udarności jak i zginania.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN-ISO 179-1:2002.
2. <http://www.spheretex.com/en/produktverarbeitung74.html>.
3. PN-EN-ISO 14125
4. Misiak J., Statyka i wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa, 2014.
5. Kukliński M., Determination of tensile and compressive moduli of laminae in unidirectionally reinforced laminate by flexural tests, SCIENTIFIC SESSION OF APPLIED MECHANICS IX: Proceedings of the IX Polish National Conference on Applied Mechanics, Bydgoszcz 25.11.2016, <http://aip.scitation.org/toc/apc/1822/1?expanded=1822>

Mechanical properties of glass – polyester composites with sphereskin sandwich layer

Paper compared mechanical properties of glass – polyester laminates with these of sandwich composites with sphereskin layer. The most important conclusions are:

1. *The values of bending modulus of both materials are comparable.*
2. *In bending and toughness tests all laminate specimens fractured by exceeding the admissible normal stress.*
3. *In bending and toughness tests all sandwich composite specimens fractured by exceeding the admissible shearing stress.*
4. *The sphereskin sandwich layers of composite must be separated by glass mat or veil to improve shear strength.*

Autor:

Dr inż. **Mariusz Kukliński** – Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Zakład Mechaniki Stosowanej, e-mail: mariusz.kuklinski@utp.edu.pl.